УДК 537.52

# ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ РАЗРЯД ПО ПОВЕРХНОСТИ ТВЕРДОГО ДИЭЛЕКТРИКА. 2. ИССЛЕДОВАНИЕ СИЛЬНОТОЧНОГО КОММУТАТОРА

А.Н. Григорьев[1,2], А.В. Павленко[2], А.П. Ильин[1], Е.И. Карнаухов[2]

[1]НИИ высоких напряжений Томского политехнического университета
E-mail: alex_nick@mail.ru
[2]РФЯЦ – Всероссийский НИИ технической физики им. акад. Е.И. Забабахина, г. Снежинск

*Экспериментально исследовались влияние зарядного напряжения и индуктивности нагрузки на характеристики коммутатора, работающего на принципе пробоя по поверхности диэлектрика. Измерены импеданс, активное сопротивление и индуктивность при различных режимах работы коммутатора. Обнаружено, что для времени 5...18 мкс имеет место квазистационарная стадия разряда, когда индуктивность и активное сопротивление коммутатора постоянны.*

## Введение

При разработке современных электрофизических установок возникает необходимость проведения их предварительного исследования, учитывающего физические процессы, которые протекают в накопителе энергии, коммутаторе и нагрузке. Для этого нужны детальные сведения о количественных характеристиках этих процессов. Такие исследования становятся особенно актуальными в настоящее время, когда параметры установок приближаются к предельным, и требования к качественным и количественным характеристикам электрофизических установок резко возрастают. Коммутатор является ключевым элементом, в том плане, что обеспечивает возникновение и существование самого процесса ввода энергии в нагрузку.

Повышение скорости ввода энергии в нагрузку вынуждает предпринимать попытки сведения к минимуму индуктивности и активного сопротивления всего разрядного контура. При этом вклад индуктивности коммутирующего разрядника в индуктивность контура может достигать 40 %, а энерговыделение в коммутаторе к моменту времени $t \cong T/4$ (первому максимуму тока) – величины порядка 30 % от общего запаса конденсаторной батареи [1]. Таким образом, коммутатор, с одной стороны, уменьшает амплитуду тока в нагрузке, а, с другой, снижает КПД передачи энергии из емкостного накопителя в нагрузку. Первая и вторая проблемы тесно связаны между собой.

Любой коммутатор (разрядник) обладает характерным для него временем коммутации – зависимостью напряжения на коммутаторе $U_k(t)$ или сопротивления коммутатора $R_k(t)$ от времени [2]. Эту зависимость принято называть характеристикой коммутации. Как было показано [2], эта характеристика определяется как типом самого коммутатора, так и протекающим через коммутатор током $I(t)$, т.е. $U_k(t)$ зависит от зарядного напряжения накопителя $U_0$ и импеданса $Z_н$ нагрузки.

Низкоиндуктивные многоискровые разрядники, работающие на принципе пробоя по поверхности диэлектрика [3, 4], часто используются при построении сильноточных генераторов тока. В процессе включения их сопротивление заметно изменяется, проходя область интенсивного поглощения энергии из контура.

На практике наиболее простыми способами регулирования скорости ввода энергии является изменение индуктивности контура и изменение зарядного напряжения конденсаторной батареи. При этом изменяются характеристики коммутатора, и наиболее надежные данные по энерговводу в нагрузку можно получить только из осциллограмм тока и напряжения на нагрузке. Поэтому, необходимо знать, каким образом изменяются характеристики коммутатора с изменением запасенной в накопителе энергии и импеданса нагрузки.

Перечисленные ранее [5] особенности развития и существования поверхностного разряда позволя-

ют полагать, что характер зависимости импеданса, активного сопротивления и индуктивности разрядного промежутка от времени $Z_k(t)$, $R_k(t)$ и $L_k(t)$ будут иметь свои особенности по сравнению с искровыми разрядными промежутками.

Целью работы является исследование влияния зарядного напряжения накопителя $U_0$ и индуктивности нагрузки $L_н$ на характеристики ($Z_k$, $R_k$, $L_k$) разрядника, работающего на принципе пробоя по поверхности диэлектрика.

### Методика и описание эксперимента

Объектом исследования являлся коммутатор со скользящим разрядом в воздухе по поверхности твердого диэлектрика (рис. 1). Искровой промежуток образован двумя основными электродами (высоковольтный – 2 и коллектор – 4), между которыми расположен третий, управляющий (инициирующий) электрод – 3, подключенный к источнику поджигающих импульсов. Суммарная величина двух разрядных промежутков составляла 5 см, при этом ширина инициирующего электрода – 1 см; зазоры выставлялись в соотношении 3:2. Протяженность электродной системы составляла 45 см. Основная изоляция токопроводов – 7 выполнена из 8 листов пленочного полиэтилена толщиной 140 мкм каждый. Диэлектриком – 6 служил стеклотекстолит толщиной 2 мм. Емкость конденсаторной батареи $C_0$ составляла 79 мкФ (ИК-50-3). Источником поджигающих импульсов служил кабельный импульсный трансформатор [6]. Амплитуда поджигающих импульсов составляла 120 кВ, длительность фронта – 60 нс.

Эксперименты проводились в два этапа. На первом этапе измерялось падение напряжения на коммутаторе с помощью омического делителя с разделительной емкостью $C_i$ (рис. 2). Ток измерялся с помощью пояса Роговского. По величине протекающего через коммутатор тока $I(t)$ и падению напряжения на коммутаторе $U_k(t)$ определялся импеданс каналов разряда в функции времени $Z_k(t)=U_k(t)/I(t)$.

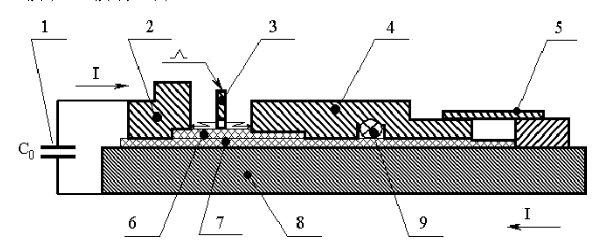



*Рис. 1.* Схематическое изображение экспериментального стенда для определения характеристик коммутатора: 1) емкостной накопитель энергии, 2) высоковольтный электрод, 3) управляющий электрод, 4) коллектор, 5) эквивалентная нагрузка, 6) диэлектрик, 7) прокладка, 8) обратный токопровод, 9) пояс Роговского

Эксперименты проводились при зарядных напряжениях накопителя 20 и 26 кВ. На рис. 2 представлена схема, поясняющая принцип измерения характеристик разрядника. Падение напряжения на коммутаторе $U_k(t)$ измерялось двумя делителями напряжения ДН1 и ДН2. ДН1 закреплялся на высоковольтном электроде, ДН2 – подключался к низковольтному электроду (коллектору). Коллектор представляет собой стальную плиту с канавкой, в которой размещали самоинтегрирующий пояс Роговского для измерения тока в контуре (рис. 1). Поправка на погрешность пояса Роговского проводилась в соответствии с рекомендациями [7]. Регистрация сигналов проводилась с помощью четырехканального осциллографа Tektronix TDS 2024. Погрешность измерений составляла 10 %.

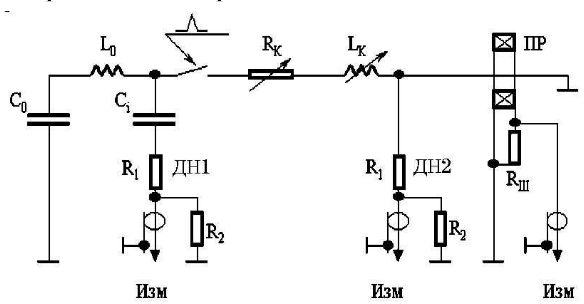



*Рис. 2.* Схема, поясняющая принцип измерения электротехнических характеристик разрядника: $C_0$ – ёмкость конденсаторной батареи; $L_0$ – индуктивность контура; $R_k(t)$ – активное сопротивление коммутатора; $R_ш$ – сопротивление шунта; $L_k(t)$ – индуктивность коммутатора; $C_i$ – разделительная ёмкость; ДН1, ДН2 – делители напряжения; ПР – пояс Роговского

Значительной проблемой является определение активной составляющей $R_k(t)$ и индуктивности $L_k(t)$ коммутатора, которые является функциями времени и тока. Для их оценки на втором этапе эксперимента по осциллограммам тока в контуре и напряжения на модельной нагрузке определяли сопротивление $R_c(t)$ и индуктивность $L_c(t)$ контура, а также индуктивность $L_н$ нагрузки. $R_c$ и $L_c$ вычислялись по осциллограмме тока в контуре (периоду колебаний и декременту затухания). В этом случае проводился разряд конденсаторной батареи на моделируемую нагрузку. Индуктивность нагрузки (медной пластины) варьировалась за счет изменения расстояния до обратного токопровода (рис. 1). Медная пластина толщиной 1,5 мм имела размеры 100×100 мм. Пластина была выбрана из-за простоты теоретической оценки ее индуктивности и получения экспериментальных данных по коммутатору применительно к электрическому взрыву фольг [8]. Сопротивление $R_н$ и индуктивность $L_н$ нагрузки не зависели от $t$ и были известны (определены экспериментально). Варьирование $L_н$ на втором этапе эксперимента позволило определить зависимость индуктивности и активного сопротивления коммутатора от $L_н$.

### Результаты экспериментов

Величина $U_k$ в любой момент времени $t$ протекания тока определяется следующим образом:

$$U_k(t)=(R_k+dL_k/d_t)\cdot I(t)+L_k dI/dt=R_d\cdot I(t)+L_k dI/dt=Z_k\cdot I(t),$$

где $R_d$ – динамическое сопротивление коммутатора.

Влияние зарядного напряжения на динамику изменения импеданса $Z_k$ и проводимости $\sigma_k=1/Z_k$ коммутатора показано на рис. 3. За начало отсчета времени $t$ брался момент прихода поджигающего импульса на инициирующий электрод. Как следует из рис. 3, сопротивление коммутатора уменьшается с ростом напряжения накопителя. Аналогичные качественные зависимости для одно- и многоканальных тригатронных разрядников были ранее получены в [9]. Следует отметить, что первые несколько десятков нс сопротивление $Z_k(t)=U_k(t)/I(t)$ определяется с довольно большой погрешностью. Это связано с малой величиной протекающего тока и, как следствие, большим влиянием помех на измерения на начальной стадии развития разряда. Как видно из рис. 3, влияние напряжения $U_0$ более заметно до момента времени $t<0{,}5$ мкс для зависимости $Z_k(t)$, а при $t>0{,}5$ мкс – для $\sigma_k(t)$.

Зависимости индуктивности и активного сопротивления коммутатора от индуктивности нагрузки для диапазона времени $t$=5...18 мкс приведены на рис. 4. Индуктивность коммутатора определялась как $L_k=L_c-L_{con}-L_н$, где $L_{con}$=6 нГн – индуктивность кабелей, коллектора, токопроводов, конденсаторной батареи. Активное сопротивление коммутатора определялось аналогичным образом.

На начальной стадии развития разряда, когда происходит формирование и расширение канала разряда ($dL_k/dt$ – имеет большое значение) выделить из $R_d$ компоненту $R_k$ затруднительно. В дальнейшем с 4...6 мкс до 18...20 мкс $R_d \approx R_k$, индуктивность коммутатора остается практически постоянной и слабо зависит от $L_н$.

Следует отметить, что в [10] для коммутатора, работающего на разряде по поверхности, но срабатывающего на самопробое, при коммутации индуктивного накопителя, расчетный и измеренный импедансы также остаются постоянными в интервале времени 5...10 мкс.

### Выводы

1. Для оптимизации скорости и КПД энерговвода в нагрузку необходимо знать характеристики коммутатора, и как они меняются с изменением запасенной в накопителе энергии и импеданса нагрузки. Возможность получения многоканального завершенного разряда по поверхности

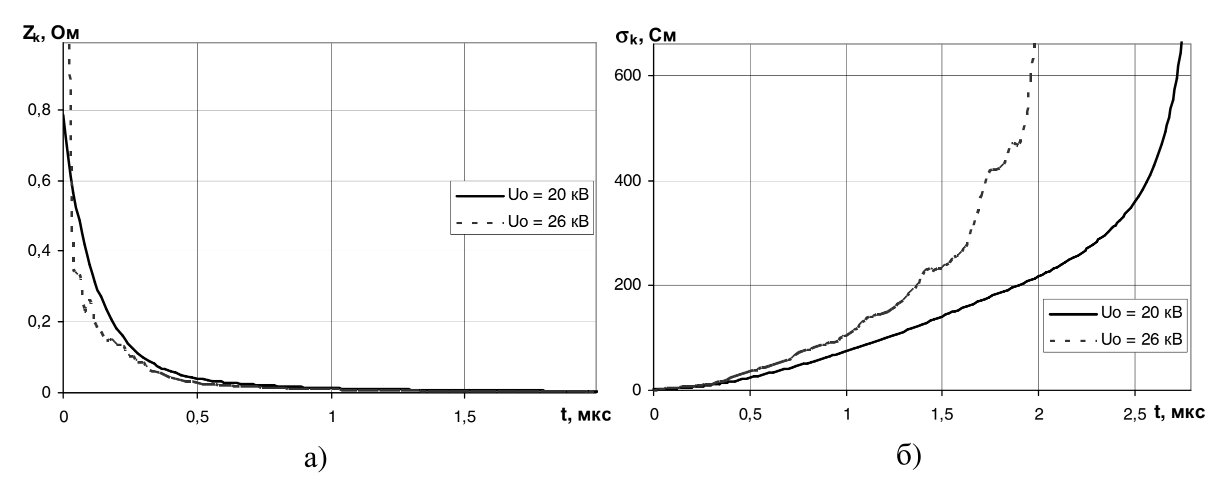



*Рис. 3. Зависимость а) импеданса и б) проводимости коммутатора от времени при различных напряжениях накопителя*

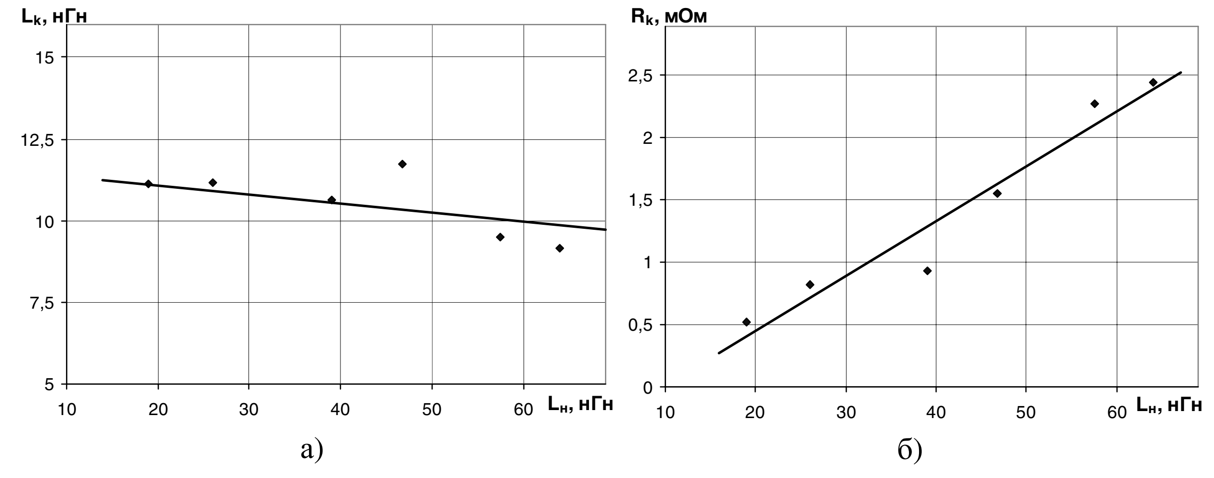



*Рис. 4. Зависимость а) индуктивности и б) активного сопротивления коммутатора от индуктивности нагрузки для времени 5...18 мкс, $U_0$=20 кВ*

диэлектрика позволяет использовать его при построении сильноточных генераторов тока.

2. С ростом зарядного напряжения накопителя импеданс коммутатора, работающего на скользящем разряде, уменьшается, что качественно совпадает с работой тригатронных разрядников. Характерной особенностью разрядника, работающего на явлении пробоя по поверхности твердого диэлектрика, является постоянство его электротехнических характеристик (активного сопротивления и индуктивности) для интервала времени $t \cong 5...18$ мкс.
3. Наряду с задачей определения характеристик разрядников, работающих на скользящем разряде, важно владеть методами снижения электрических потерь, подбирая режимы их работы при заданных зарядном напряжении и нагрузке. Проблема снижения потерь требует отдельного, более подробного изучения.

## СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ


1. Дашук П.Н., Кичаева Г.С. и др. Исследование формирования и динамика сильноточного разряда в управляемом вакуумном коммутаторе // Журнал технической физики. – 1978. – Т. 48. – № 4. – С. 736–741.
2. Месяц Г.А. Импульсная энергетика и электроника. – М.: Наука, 2004. – 704 с.
3. Григорьев А.В., Дашук П.Н. и др. Малоиндуктивный мегаамперный коммутатор тока на скользящем разряде // Приборы и техника эксперимента. – 1976. – № 4. – С. 151–154.
4. Дашук П.Н. Коммутация импульсных токов разрядниками со скользящим разрядом // Высоковольтные искровые и взрывные коммутаторы: Тез. докл. совместного заседания секций научных советов АН СССР «Научные основы электрофизики и электроэнергетики» и «Проблемы мощной импульсной энергетики». Томск: Красное знамя, 1986. – С. 5–8.
5. Григорьев А.Н., Павленко А.В., Ильин А.П., Карнаухов Е.И. Некоторые аспекты поверхностного разряда. 1. Особенности развития и существования поверхностного разряда (литературный обзор) // Известия Томского политехнического университета. – 2006. – Т. 309. – № 1. – С. 66–69.
6. Беляев Г.И., Дашук П.Н. Способы управления малоиндуктивными сильноточными разрядниками со скользящим разрядом // Журнал технической физики. – 1983. – Т. 53. – № 3. – С. 466–468.
7. Окунь И.З. Измерение разрядных токов // Приборы и техника эксперимента. – 1968. – № 6. – С. 120–125.
8. Афанасьев В.Н., Галицкий М.В. и др. Электровзрывной генератор ударных волн // Экстремальные процессы и состояния: Труды V Забабахинских научных чтений. – Снежинск, 1999. – С. 127–128.
9. Емельянов В.Г., Ковальчук Б.М., Лавринович В.А., Месяц Г.А. и др. Многоискровой высоковольтный тригатрон // Приборы и техника эксперимента. – 1975. – № 4. – С. 89–92.
10. Reinovsky R.E., Goforth J.H. e.a. Surface-discharge switches for high-perfomance closing applications // IEEE Trans. Plasma Sci. – 2004. – V. 32. – № 5. – P. 1765–1777.


УДК 621.315